ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА

Якимов Михаил Ростиславович
доктор технических наук, директор Института транспортного планирования Российской академии транспорта, профессор кафедры «Организация и безопасность движения» МАДИ

Цель и задачи

Цель – разработать алгоритм поиска транспортных коридоров для возможного движения пассажирского транспорта большой провозной способности

Задачи:

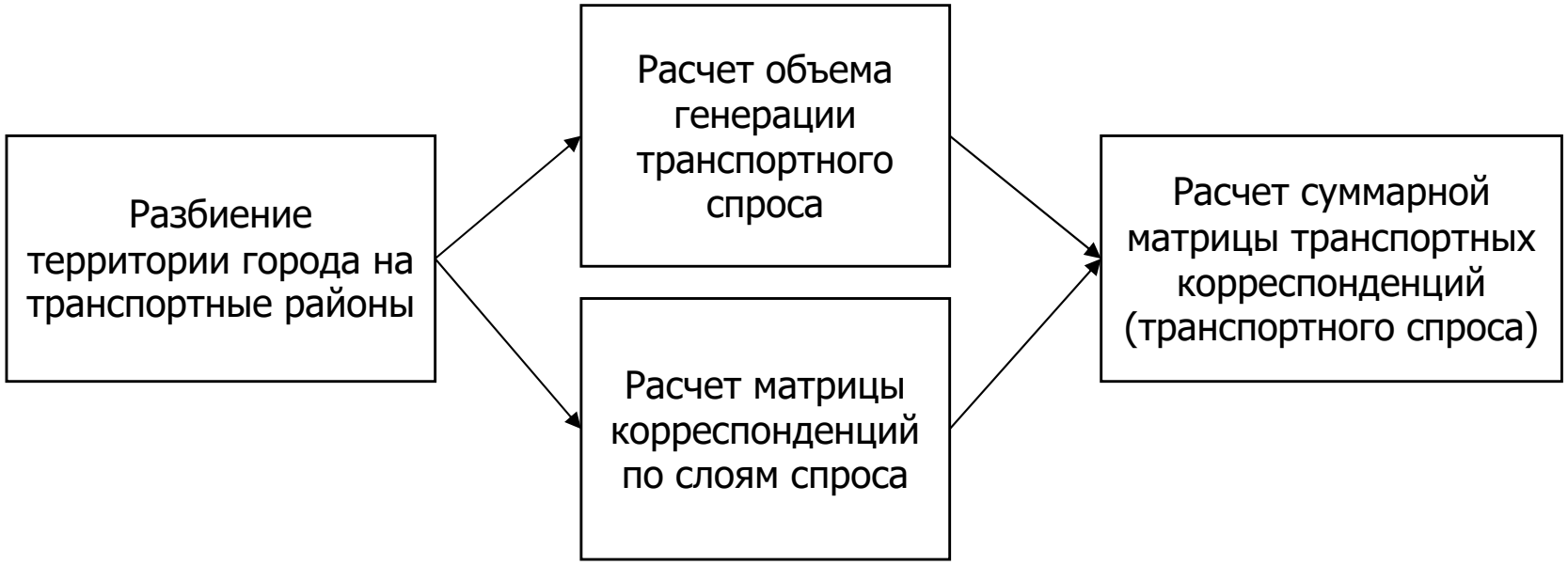
1. Построение модели транспортного спроса
2. Графическое представление транспортного спроса на территории города
3. Определение параметров коридоров для движения транспорта большой провозной способности
4. Разработка алгоритма поиска транспортных коридоров в поле транспортного спроса
5. Экономическое обоснование целесообразности организации движения транспорта большой провозной способности на основе анализа существующего транспортного спроса

Построение модели транспортного спроса

Транспортный спрос – это устойчивый объем совершаемых транспортных перемещений, сложившийся в результате социально-экономических процессов, проходящих на отдельной территории

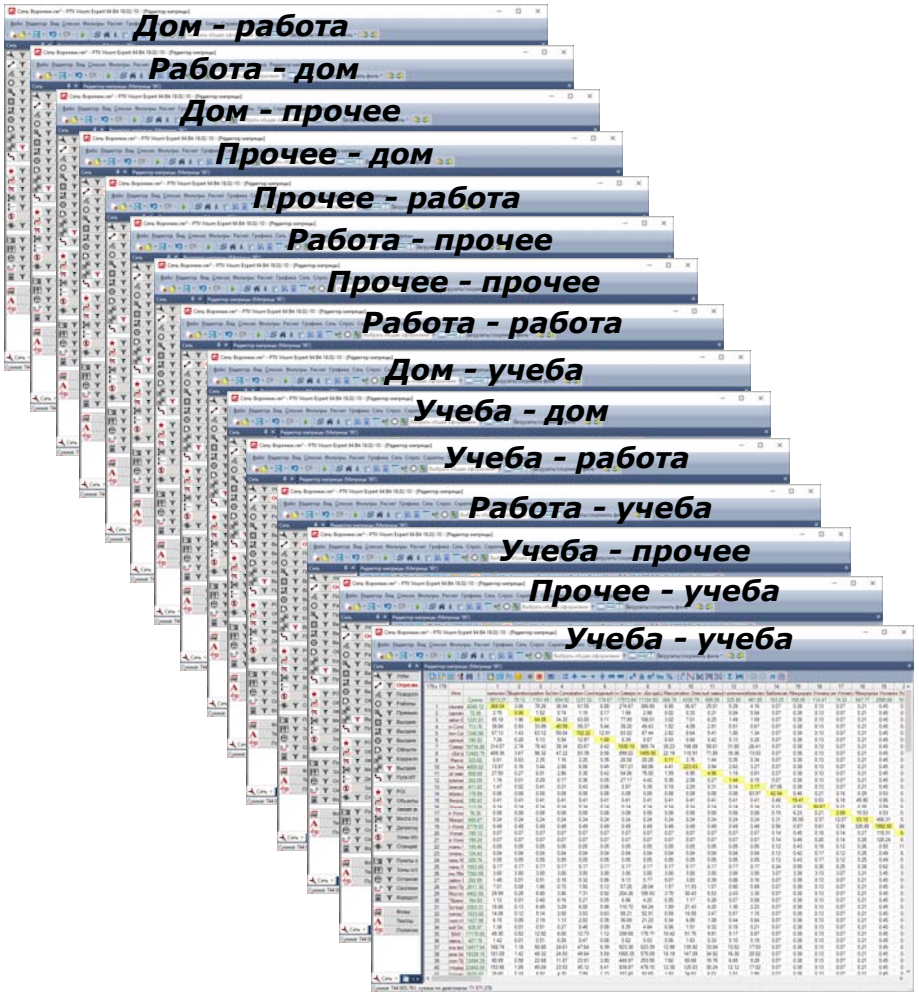
Исходные данные:

1. Данные статистики: сведения о населении, в том числе трудоспособном, о рабочих местах, включая сферу услуг, о количестве студентов и учебных местах
2. Результаты опросов населения о параметрах транспортной подвижности, на основе которых определяется объем транспортного спроса, формируются слои спроса, строятся функции предпочтения



Построение модели транспортного спроса

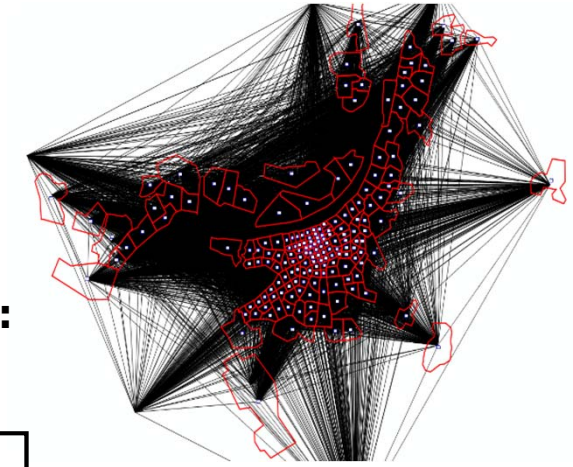
15 слоев транспортного спроса, основные источники и цели поездок: дом, работа, учёба, прочее



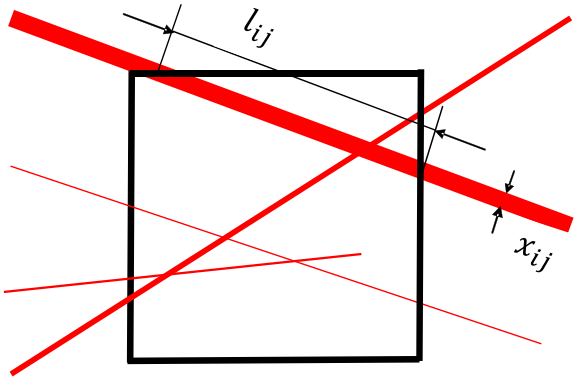
Слои спроса	Источник	Цель
Дом - Работа	Трудящееся население	Места приложения труда
Работа - Ром	Места приложения труда	Трудящееся население
Дом - Прочее	Трудящееся население	Места приложения труда в сфере услуг
Прочее - Дом	Места приложения труда в сфере услуг	Трудящееся население
Работа - Прочее	Места приложения труда	Места приложения труда в сфере услуг
Прочее - Работа	Места приложения труда в сфере услуг	Места приложения труда
Работа - работа	Места приложения труда	Места приложения труда
прочее - прочее	Места приложения труда в сфере услуг	Места приложения труда в сфере услуг
Дом - учеба	Студенты	Учебные места
Учеба – дом	Учебные места	Студенты
Работа – учеба	Места приложения труда	Учебные места
Учеба – работа	Учебные места	Места приложения труда
Учеба – прочее	Учебные места	Места приложения труда в сфере услуг
Прочее – учеба	Места приложения труда в сфере услуг	Учебные места
Учеба - учеба	Учебные места	Учебные места

Визуальное представление транспортного спроса на территории города

Графическое представление матрицы корреспонденций в виде «паука» корреспонденций:



Фрагмент «паука» корреспонденций на элементарной площадке в сетке разбиения территории города:



Транспортная зависимость территории – это объем перемещения пассажиров (грузов) по данной территории (чел.•км) в течение определенного промежутка времени при идеальном удовлетворении существующего транспортного спроса:

$$G_r = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_{ij} \cdot l_{ijr}$$

r - номер ячейки регулярной сетки

n – количество отрезков (воздушных линий), соединяющих транспортные районы, проходящих через ячейку *r* регулярной сетки

i, j – номера транспортных районов

G_r - транспортная зависимость ячейки регулярной сетки *r*, чел • км в сутки

x_{ij} - значение элемента матрицы (объем) корреспонденций между *i*-м и *j*- м транспортными районами, чел./сутки

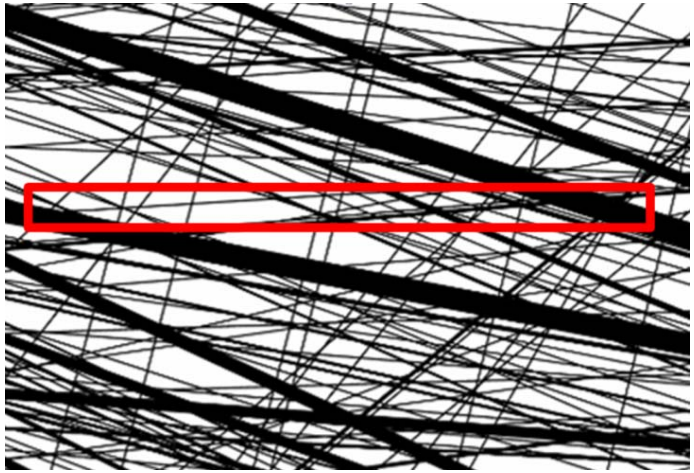
l_{ijr} - доля длины корреспонденции между *i*-м и *j*-м транспортными районами, попадающая в ячейку регулярной сетки *r*, км.

Наибольшую транспортную зависимость имеет территория в центральной части города

Принципы поиска потенциальных коридоров для движения транспорта большой провозной способности

Параметром **целесообразности либо нецелесообразности организации транспорта большой провозной способности на выделенных транспортных коридорах** является **объем транспортного спроса**, на них приходящийся. Расчет объемов транспортного спроса в произвольном транспортном коридоре осуществляется через определение транспортной зависимости территории внутри транспортного коридора

Порядок расчета транспортной зависимости для ячеек регулярной сетки:



Для каждого отрезка, соединяющего центры транспортных районов *i* и *j*, проверяется его принадлежность выделенному транспортному коридору. Если часть отрезка принадлежит транспортному коридору *p*, то рассчитывается длина l_{ij_p}.

$$G_p = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_{ij} \cdot l_{ijp}$$

где

G_p – транспортная зависимость потенциального транспортного коридора *p*, чел • км в сутки

p* – номер потенциального транспортного коридора *p

n – количество отрезков (воздушных линий), соединяющих транспортные районы, попадающих в потенциальный транспортный коридор *p*

i, j – номера транспортных районов

x_{ij} – значение элемента матрицы (объем) корреспонденций между *i*-м и *j*- м транспортными районами

l_p – сумма долей длин всех корреспонденций, попадающих в потенциальный транспортный коридор *p*

l_{ijp} – доля длины корреспонденции между *i*-м и *j*-м транспортными районами, попадающая в потенциальный транспортный коридор *p*

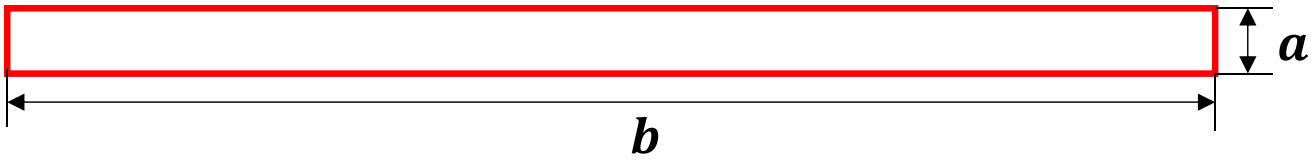
Принципы поиска потенциальных коридоров для движения транспорта большой провозной способности

В качестве потенциального транспортного коридора будет рассматриваться **прямоугольный контур.** Начало потенциального коридора будет находиться в точке территории или ячейке регулярной сетки с наибольшим значением транспортной зависимости.

Ширина a прямоугольного контура потенциального транспортного коридора **будет составлять 500 м,** что соответствует 250 метровому буферу пешей доступности с двух сторон от предполагаемой линии (СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*»)

Длина b прямоугольного контура потенциального транспортного коридора должна соответствовать средней длине трамвайного маршрута в крупных городах. Средняя длина трамвайного маршрута для крупного города составляет 12 км.

Размеры прямоугольного контура: a=0,5 км, b=12 км

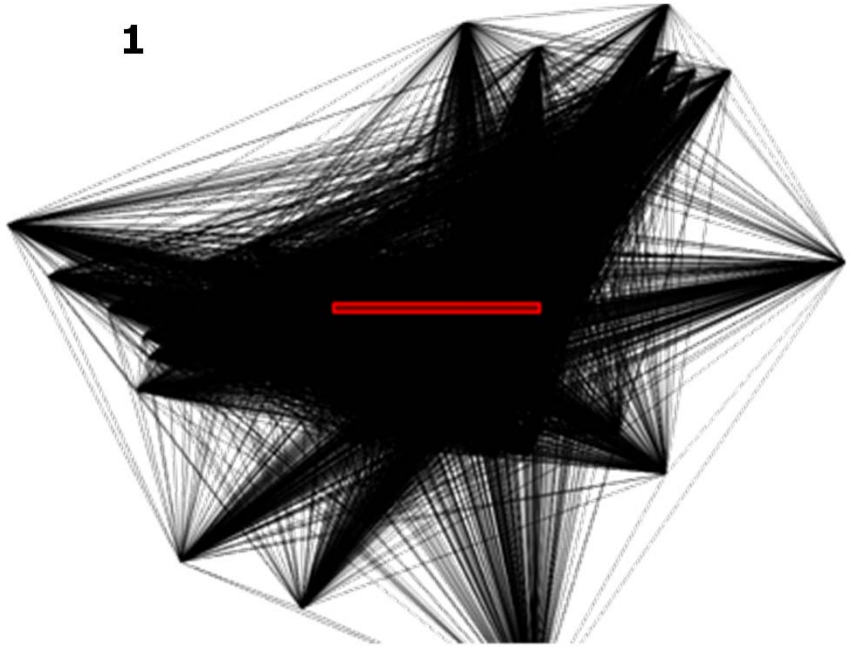


Организация трамвайного движения в крупном городе целесообразна в случае если найдется потенциальный транспортный коридор, проходящий через точку территории или ячейку регулярной сетки с наибольшим значением транспортной зависимости, для которого объем транспортного спроса будет соответствовать экономически обоснованному пассажиропотоку для трамвайной линии

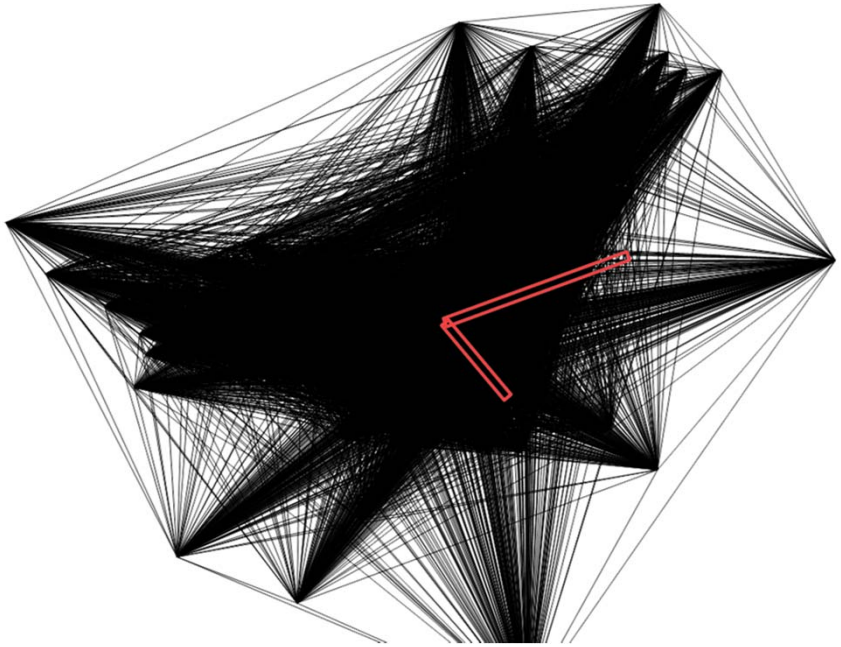
Принципы поиска потенциальных коридоров для движения транспорта большой провозной способности

Варианты поиска транспортного коридора для движения транспорта большой провозной способности:

1



2



- **простой в реализации**
- **показывает целесообразность трамвайного движения только в случае наличия большого транспортного спроса из отдаленного района в центр города**

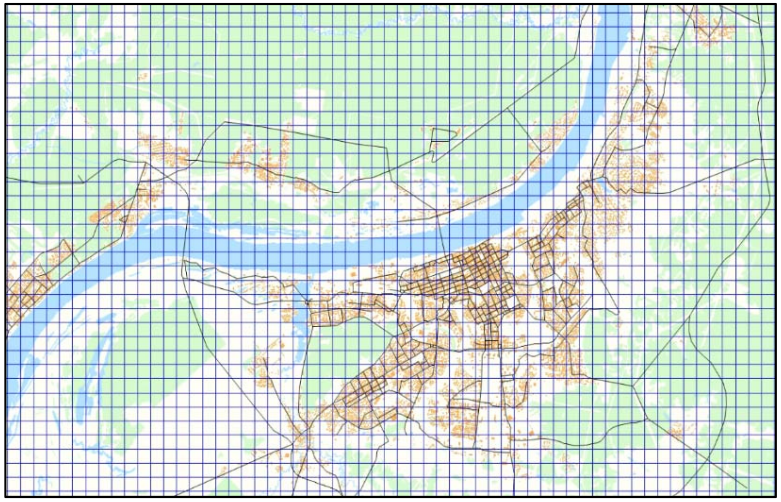
- **сложный в реализации**
- **позволяет найти конфигурацию транспортного коридора, близкую к реальной трассировке потенциальной трамвайной линии**

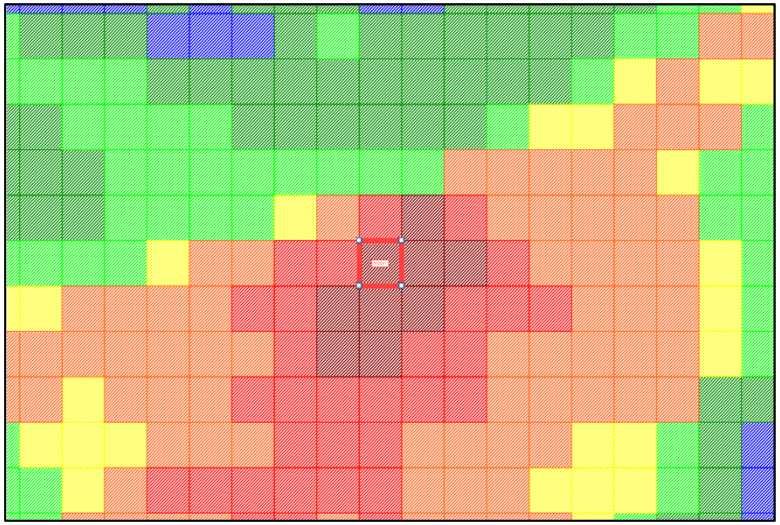
Алгоритм поиска транспортных коридоров для движения пассажирского транспорта большой провозной способности

1. Расчет суммарной матрицы транспортных корреспонденций
2. Разбивка территории города регулярной сеткой с шагом не более 500 м
3. Вычисление значения транспортной зависимости для каждой ячейки регулярной сетки
4. Выделение ячейки с максимальным значением транспортной зависимости. Данная ячейка станет центром потенциальной трамвайной линии.
5. Построение потенциальных коридоров в виде прямоугольников размером 0,5 * 12 км
6. Расчет значений транспортной зависимости и сумм длин транспортных корреспонденций
7. Переход от транспортной зависимости к определению объема транспортного спроса

$$X_p = \frac{G_p}{l_p} = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} x_{ij} l_{ijp}}{\sum_{i,j=1}^{n} l_{ijp}}$$

Где p – номер транспортного коридора, X_p – объем транспортного спроса, проходящего через транспортный коридор р, чел./сутки; G_p – транспортная зависимость потенциального транспортного коридора p, чел • км в сутки; l_p – сумма долей длин всех корреспонденций, попадающих в потенциальный транспортный коридор p, км; n – количество отрезков (воздушных линий), соединяющих транспортные районы, потенциальный транспортный коридор p; i, j – номера транспортных районов; x_{ij} – значение элемента матрицы (объем) корреспонденций между i-м и j- м транспортными районами, чел./сутки; l_{ijp} – доля длины корреспонденции между i-м и j-м транспортными районами, попадающая в потенциальный транспортный коридор p, км.





Экономическое обоснование целесообразности организации движения транспорта большой провозной способности

Потенциальная выручка от эксплуатации линии для движения транспорта большой провозной способности:

$$\boldsymbol{M = X_p \cdot t \cdot k}$$

где M – выручка от эксплуатации трамвайной линии, руб./год; X_p - объем транспортного спроса для транспортного коридора *p*, чел./сутки; t – тариф на одну поездку, руб.; k – коэффициент приведения от одного дня к году

Варианты:

1. $\boldsymbol{C > M}$ Необходимо субсидирование или повышение тарифа на проезд
2. $\boldsymbol{C \leq M}$ Линия работает в режиме самоокупаемости

По результатам проведенных в период с 2014 по 2020 г.г. натурных обследований в городах Пермь, Самара, Ижевск, Томск, Улан-Удэ, Кемерово:
Минимально необходимый пассажиропоток - 13,4 тысячи пассажиров в сутки
Предельный пассажиропоток – 60 тысяч пассажиров в сутки
(Колин А.В. Расчет пропускной и провозной способности транспортных магистралей мегаполисов при эксплуатации различных видов городского пассажирского транспорта. Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2010)

Приведенные затраты на организацию линии для движения транспорта большой провозной способности:

$$\mathbf{C = Э + К \cdot А}$$

где С - приведенные затраты на организацию трамвайной линии, руб./год; Э – эксплуатационные расходы трамвайной линии, руб./год; К – капиталовложения в строительство и подвижной состав, руб.; А – коэффициент приведения

В случае если *M ≤ C*, следует оценить экономический эффект, связанный с сокращением среднего времени реализации транспортных корреспонденций пассажиров после ввода в эксплуатацию линии для движения транспорта большой провозной способности

Экономическое обоснование целесообразности организации движения транспорта большой провозной способности

Стоимостная оценка 1 чел.-часа экономии времени может быть определена по формуле:

$$\mathbf{S} = \frac{\text{ВРП}}{\mathbf{365 \cdot 24 \cdot} \boldsymbol{N_p}}$$

Где
S - стоимостная оценка 1 чел.-часа экономии времени, руб./чел./час
ВРП – показатель валового регионального продукта региона, руб./год
N – численность экономически активного населения в стране или регионе, чел.

Экономический эффект от введения линии для движения транспорта большой провозной способности:

$$\mathbf{F = M + S \cdot \Delta T \cdot X_p / k}$$

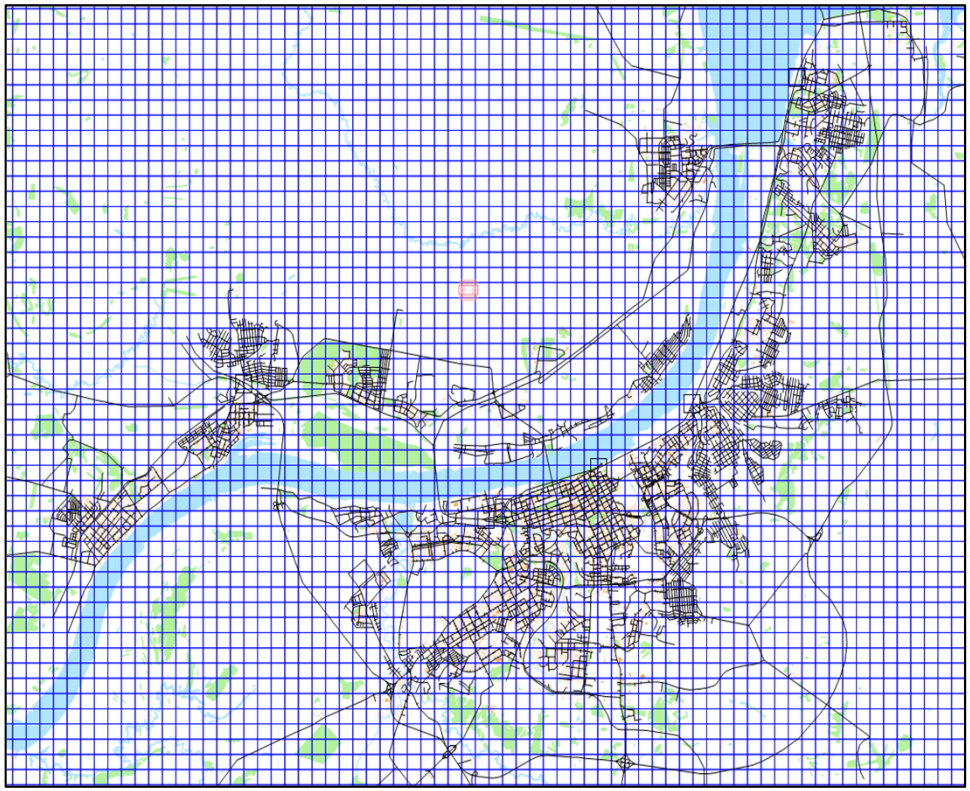
где
F - экономический эффект от введения линии, руб.
S - стоимостная оценка 1 чел.-часа экономии времени, руб./чел./час
M – выручка от эксплуатации линии, руб./год
X_p - объем транспортного спроса для транспортного коридора *p*, чел./сутки
ΔT – средняя экономия времени одним пассажиром после введения линии, час
k – коэффициент приведения от одного дня к году

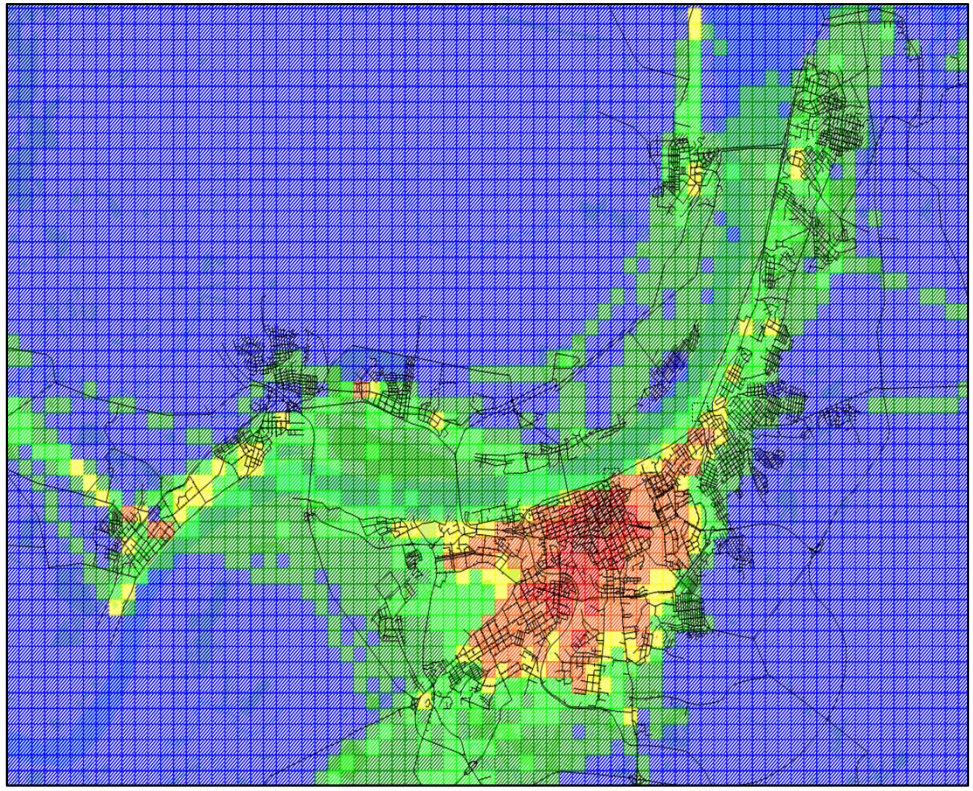
C > F → организация трамвайной линии **нецелесообразна**

C ≤ F → организация трамвайной линии **целесообразна**

Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми

Территория города была разбита регулярной сеткой размером 500 м

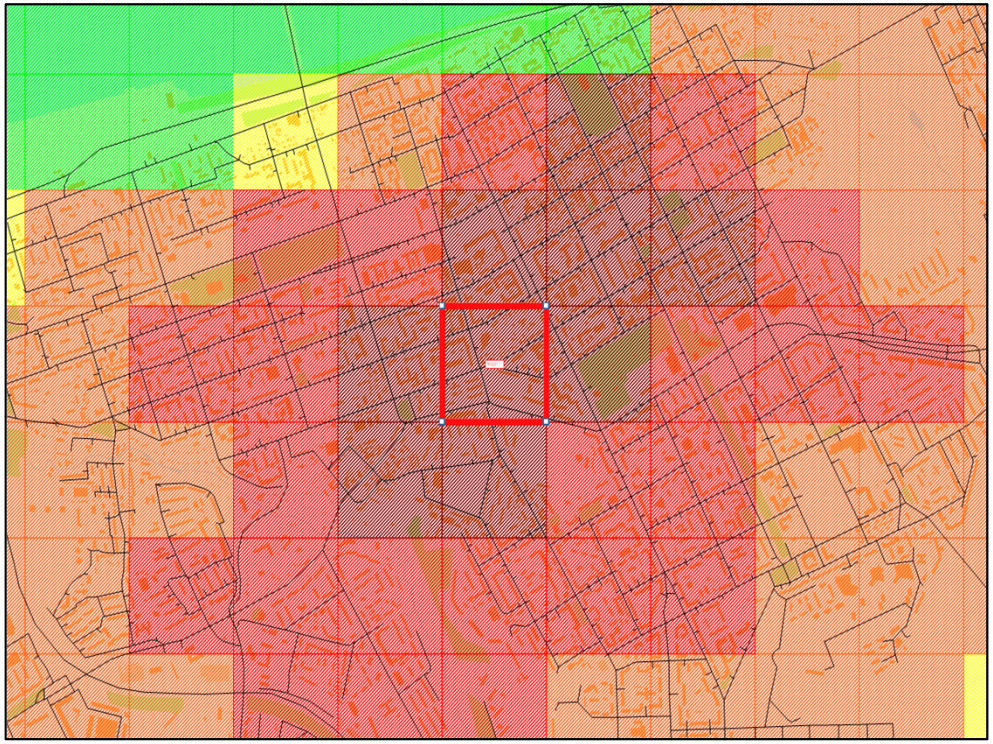




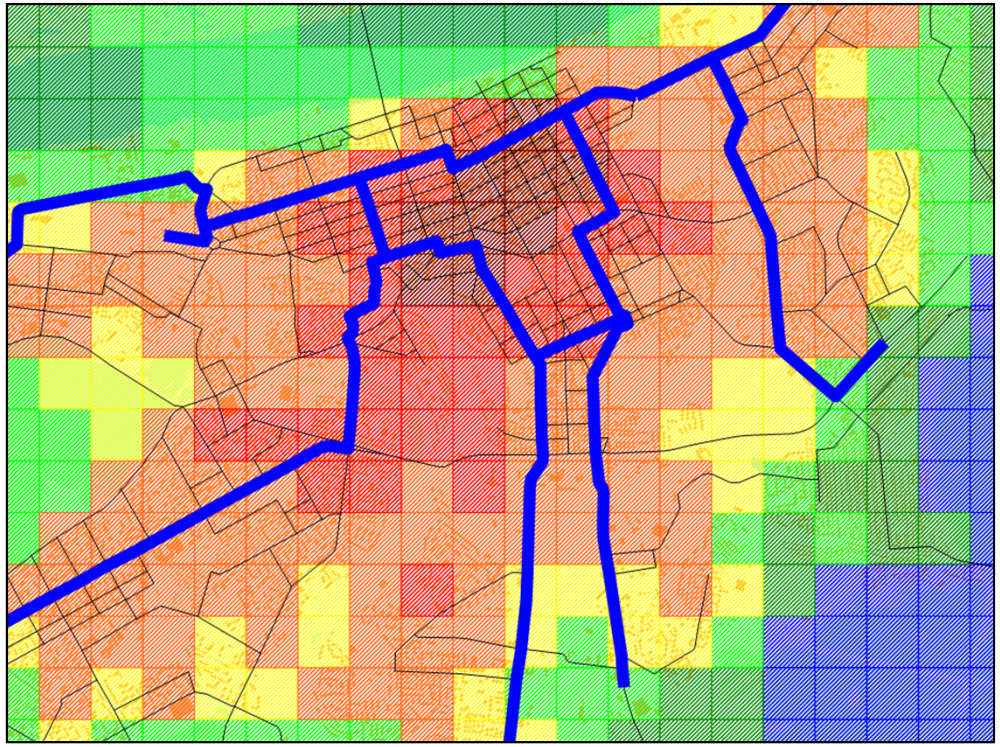
Выбрана ячейка, имеющая максимальное значение транспортной зависимости. Данная ячейка располагается на пересечении улиц Куйбышева и Революции в г. Перми. Примечательно, что через данную ячейку проходит две существующие трамвайные линии, одна из которых (по ул. Революции) была введена в эксплуатацию в 2020 году.

Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми

Выбор ячейки регулярной сетки с максимальным значением транспортной зависимости

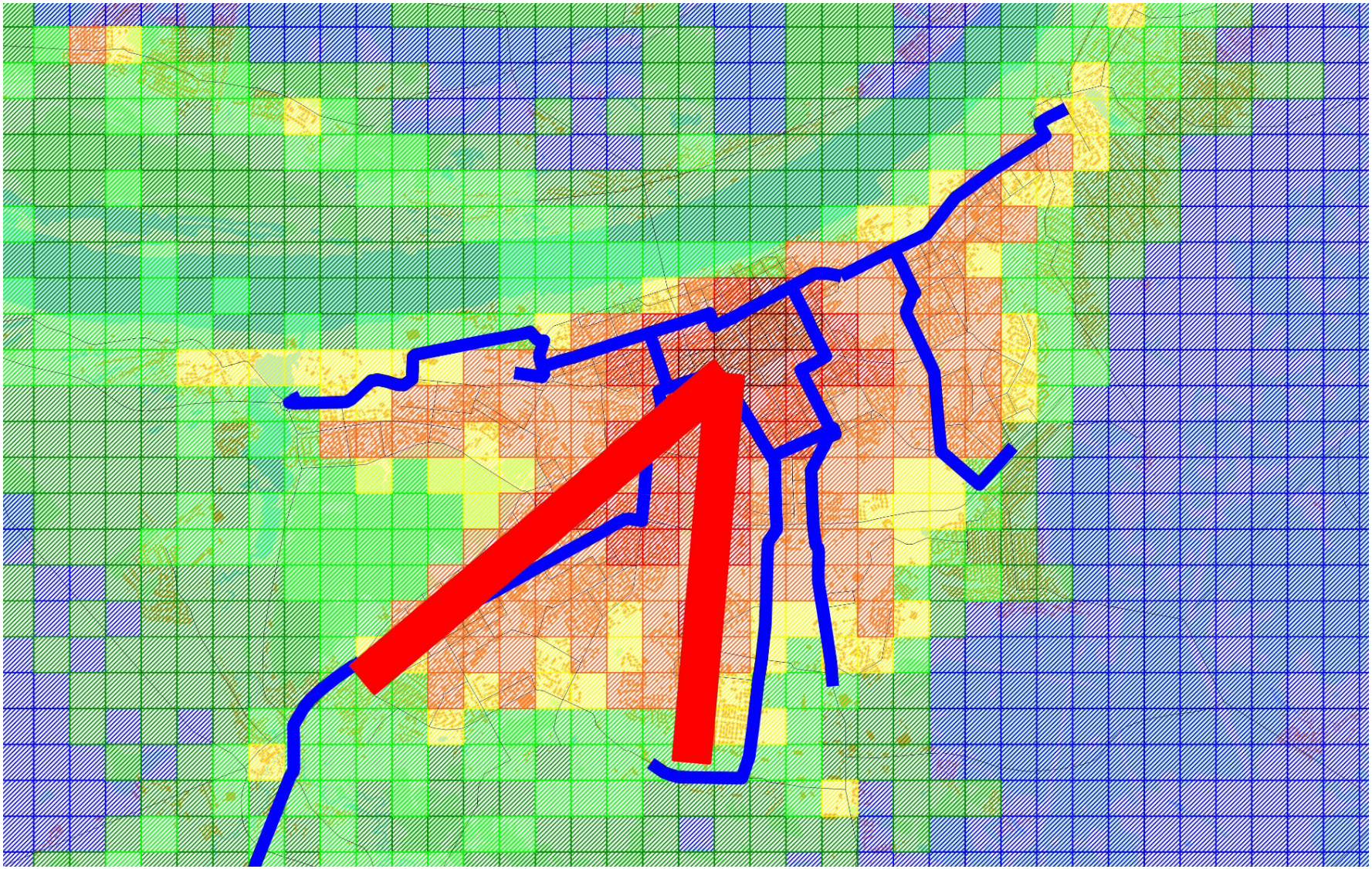


Трамвайная сеть в центральной части г. Перми, наложенная на графическое представление значений транспортной зависимости для регулярной сетки

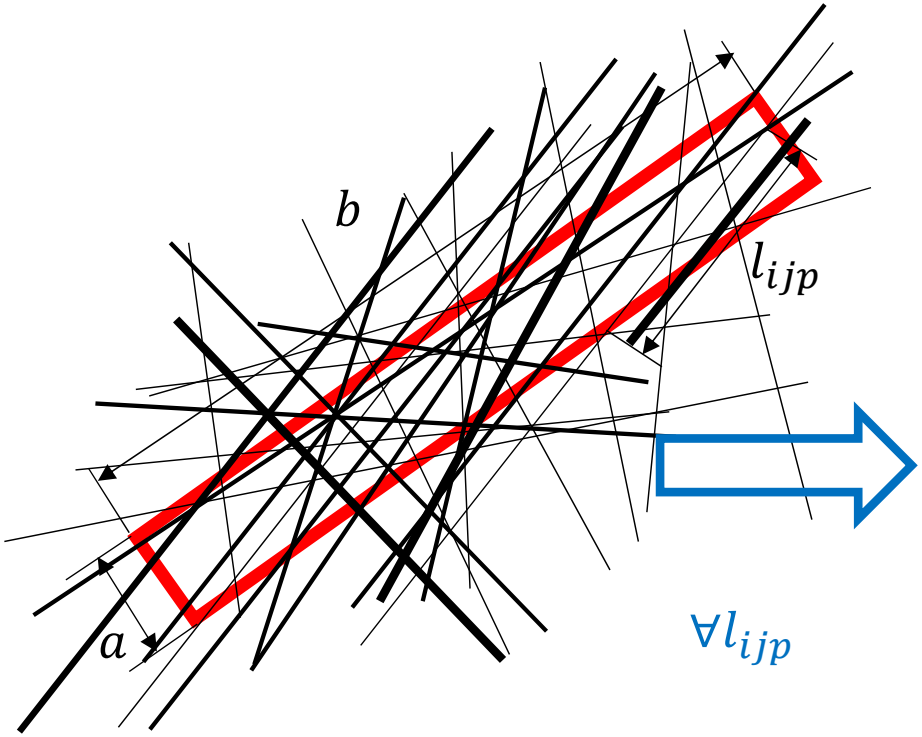


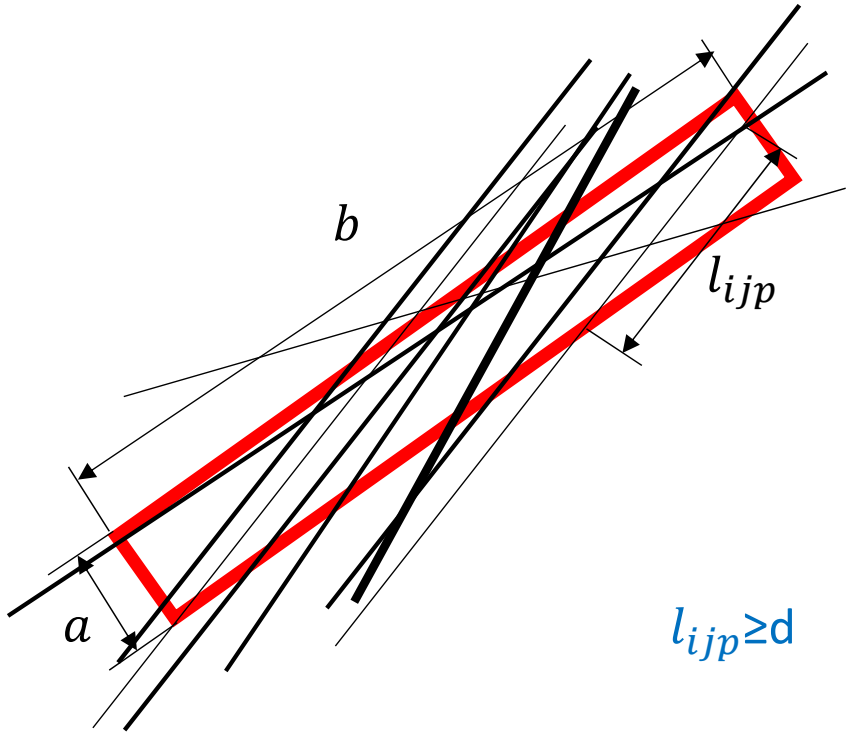
Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми

Транспортный коридор, имеющий максимальное значение транспортного спроса на территории г. Перми



Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми





Весь объем транспортного спроса

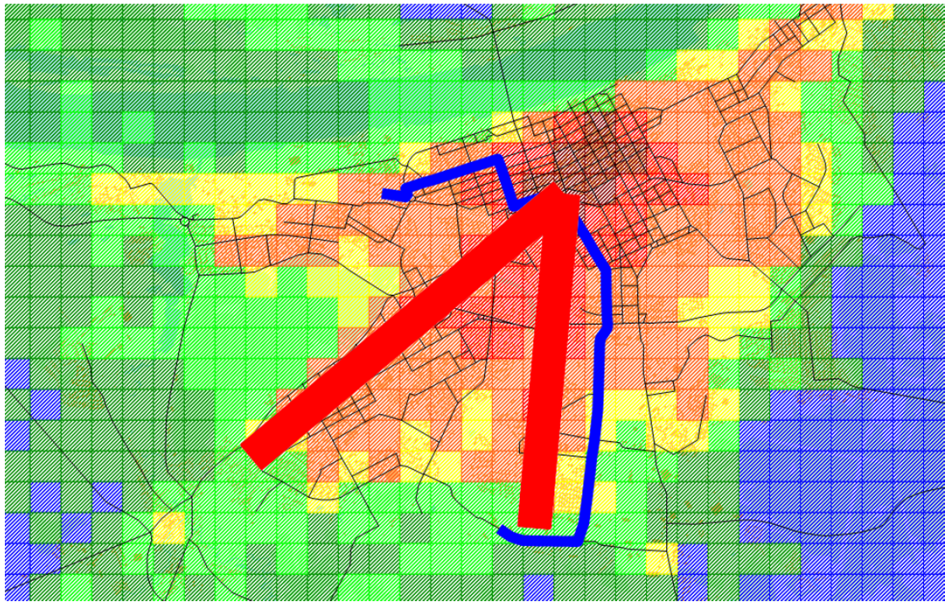
$$X_p = \frac{G_p}{l_p} = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} x_{ij} l_{ijp}}{\sum_{i,j=1}^{n} l_{ijp}} = 550 \text{ тыс. чел./сутки}$$

Только корреспонденции, пересечение которых с транспортным коридором не короче средней длины корреспонденции

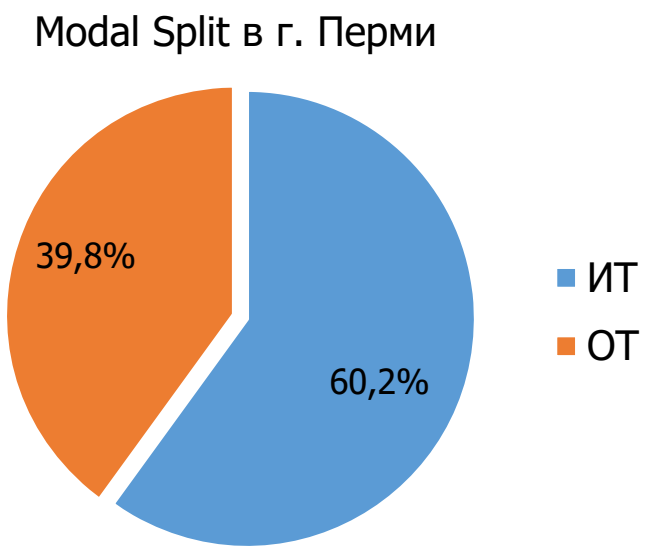
$$\begin{cases} X_p = \dfrac{G_p}{l_p} = \dfrac{\sum_{i,j=1}^{n} x_{ij} l_{ijp}}{\sum_{i,j=1}^{n} l_{ijp}} = 36{,}5 \text{ тыс. чел./сутки} \\ l_{ijp} \geq d \end{cases}$$

d – средняя длина транспортной корреспонденции в г. Перми, км

Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми



Трассировка трамвайного маршрута №5, наложенная на найденный транспортный коридор

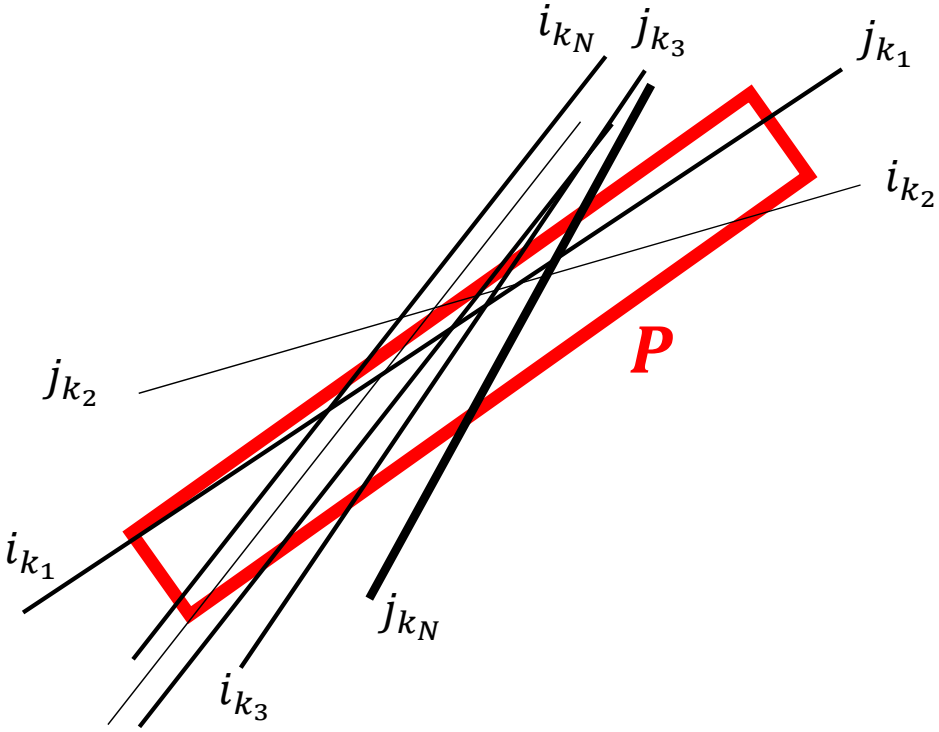


	Пассажиропоток, тыс. чел./сутки
Объем транспортного спроса всех видов транспорта, приходящийся на найденный транспортный коридор	36,5
Объем транспортного спроса на ОТ с учетом Modal Split, приходящийся на найденный транспортный коридор	14,6
Пассажиропоток на существующем трамвайном маршруте №5	15,4

Реализация трамвайного движения в городе Перми целесообразна

Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми

Поиск следующего транспортного коридора – фильтрация транспортных корреспонденций, попавших в первый транспортный коридор



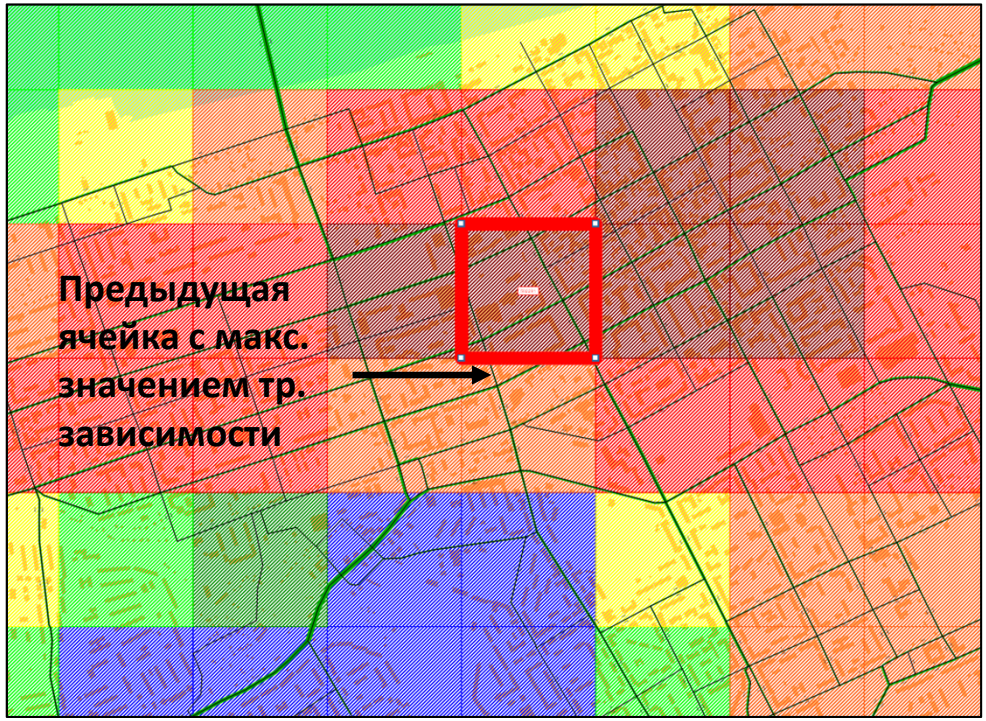
$$\forall i_k, \forall j_k,\ l_{i_k j_k} \cap \boldsymbol{P} \Rightarrow X_{i_k j_k} := 0$$

Редактор матрицы (Матрица '115 Новая матрица')

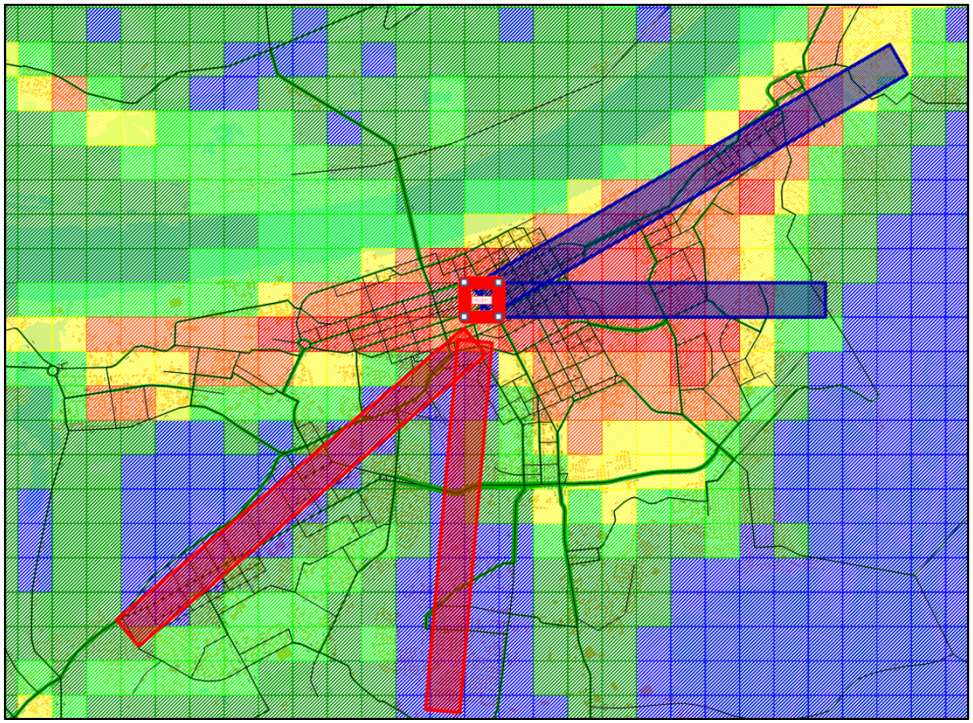
186 x 186	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
73	46.12	70.50	95.74	135.04	44.56	40.57	549.61	117.33	107.45	92.23	43.53	43.6
74	74.50	115.94	122.51	153.84	50.06	152.63	1169.37	410.27	286.12	287.48	121.16	129.
75	64.84	98.20	107.68	133.37	42.07	135.49	990.12	315.96	238.68	243.00	[illegible]	113.
76	71.56	119.86	103.51	134.21	47.99	120.85	814.71	533.49	600.43	371.75	0.00	168.
77	48.85	80.47	97.21	134.23	45.12	43.00	399.03	141.25	132.06	120.52	52.16	60.0
78	56.07	83.22	115.66	169.30	57.78	43.43	532.02	137.62	146.08	112.45	50.94	53.5
79	102.66	174.19	194.32	306.08	118.66	32.50	359.32	197.66	294.35	212.52	75.69	134.
80	47.20	90.28	88.07	143.11	55.62	11.19	113.56	75.41	110.13	83.85	30.29	57.7
81	30.08	50.78	62.49	90.63	29.61	19.00	202.24	61.14	52.96	49.63	23.66	30.2
82	27.31	47.58	52.36	85.96	29.94	20.73	179.20	77.76	80.08	70.12	29.68	37.7
83	37.44	58.59	[illegible]	105.75	34.63	36.24	318.59	110.89	96.70	90.23	39.92	44.8
84	35.59	56.68	0.00	145.53	47.50	30.67	281.14	98.56	87.32	82.42	37.23	43.7
85	51.26	88.73	[illegible]	160.76	51.77	29.45	322.33	94.46	79.33	77.94	37.15	51.2
86	69.35	119.33	193.65	277.62	91.31	58.16	493.78	191.15	166.10	159.76	75.72	86.3
87	49.01	79.98	146.81	208.37	66.18	44.43	382.47	[illegible]	110.60	110.94	54.16	60.0
88	31.61	54.55	92.77	126.01	37.63	32.38	246.74	0.00	61.54	71.21	40.42	39.0
89	1.92	3.56	3.73	4.62	1.49	2.42	15.52	[illegible]	8.90	6.18	2.98	2.8
90	3.35	5.91	6.53	8.33	2.74	3.15	24.44	10.42	10.00	8.69	4.23	4.7
91	31.87	54.27	63.94	79.99	25.07	34.00	272.75	102.89	85.90	80.65	41.40	42.7
92	40.74	69.18	81.40	103.12	32.60	42.25	345.53	128.76	98.17	101.91	51.59	53.9
93	52.04	85.32	105.81	138.01	43.96	53.47	483.82	160.13	127.31	127.72	61.36	64.5
94	30.16	52.94	58.67	76.95	25.68	26.73	218.04	90.41	80.29	77.02	36.26	41.8
95	10.73	18.44	21.32	26.61	8.43	11.25	87.96	34.60	29.99	27.41	13.98	14.6
96	44.85	75.88	90.64	111.85	33.85	51.62	400.90	149.24	101.65	112.03	61.41	59.6
97	42.29	74.69	83.14	104.40	32.46	44.71	331.37	137.44	112.20	107.81	58.21	59.7
98	49.95	90.83	143.25	203.41	64.69	48.61	344.35	158.25	120.63	129.78	68.31	73.9
99	29.99	63.64	50.44	71.33	27.26	16.08	72.01	126.06	202.25	108.21	41.51	55.7
100	49.21	129.41	74.00	97.75	40.79	2.98	14.09	275.75	720.70	258.00	97.07	125.
101	34.55	43.96	66.05	89.84	34.80	8.15	83.51	34.75	37.34	39.04	12.30	31.3
102	34.53	41.84	62.07	83.76	33.15	6.25	61.73	30.10	32.73	35.24	10.64	29.8
103	36.85	43.56	68.58	89.52	34.12	9.51	101.67	33.95	32.91	37.03	11.92	30.7
104	31.62	35.04	58.80	73.65	27.24	9.48	104.86	27.70	23.72	28.78	9.66	24.3

Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми

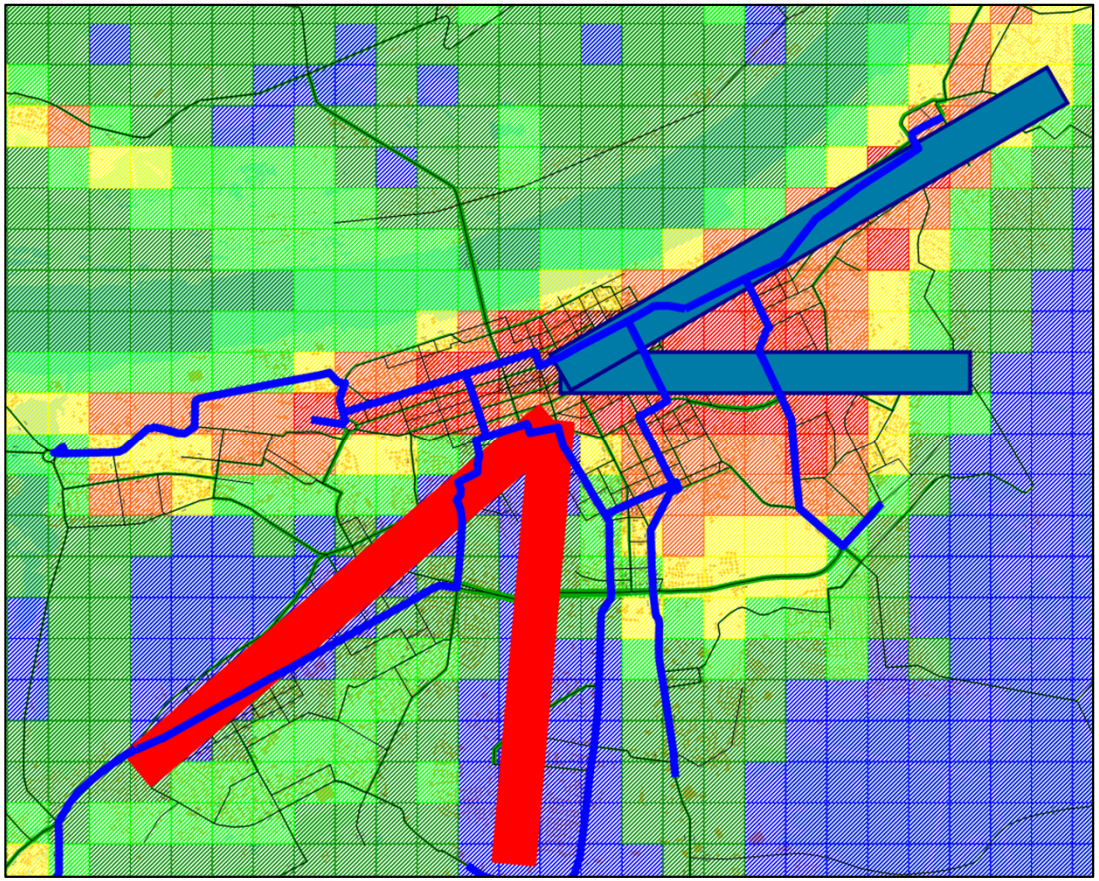
Выбор новой ячейки регулярной сетки с максимальным значением транспортной зависимости после фильтрации корреспонденций, попавших в первый транспортный коридор



Новый транспортный коридор



Расчет экономической целесообразности работы транспорта большой провозной способности на примере города Перми



Трамвайная сеть г. Перми, наложенная на найденные транспортные коридоры

	Пассажиропоток, тыс. чел./сутки
Объем транспортного спроса всех видов транспорта, приходящийся на второй транспортный коридор	27,4
Объем транспортного спроса на ОТ с учетом Modal Split, приходящийся на второй транспортный коридор	10,9

Возможно продолжить поиск следующих транспортных коридоров и маршрутов трамвая

ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА

Спасибо за внимание!

Якимов Михаил Ростиславович
E-mail: yakimov@rosacademtrans.ru